

Propriétés de transfert thermique d'un coulis de paraffine stabilisée

Laurent ROYON^{1,2}, François TRINQUET², Gérard GUIFFANT²

¹ Université Paris Est, IUT Marne la Vallée, 2 rue A. Einstein 77420 Champs sur Marne

² Université Paris Denis Diderot, Laboratoire de MSC, 75103 PARIS

* (auteur correspondant : royon@univ-mlv.fr)

Résumé - Des particules millimétriques de matériau à changement de phase (MCP) solide-liquide de bas point de fusion (7°C) sont réalisées dans le cadre du développement d'un nouveau fluide frigoporteur diphasique. Les résultats d'investigations expérimentales sur le coefficient d'échange par convection du fluide et la durée d'une phase de fusion d'une particule de MCP sont présentés et discutés. Une modélisation globale du processus de fusion est proposée et la comparaison avec les expérimentations montre très un bon accord, validant ainsi cette approche phénoménologique.

Nomenclature

A	absorbance		<i>Symboles grecs</i>
d	diamètre, m	ρ	masse volumique, kg m^{-3}
h	coefficient d'échange, $\text{Wm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$\Delta T, \Delta \theta$	écart de température, K
C_p	chaleur spécifique, $\text{J kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	β, κ	paramètre
L	chaleur latente, kJ kg^{-1}	α	diffusivité thermique, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
M	masse, kg		<i>Indices et exposants</i>
R	rayon, m	i	initial
S	surface d'échange, m^2	f	final
t	temps, s	m	changement de phase
T	température, K	N	normalisée
z	$= 1/\Delta\theta, \text{K}^{-1}$	p	paroi

1. Introduction

De par leurs nombreux avantages, les fluides frigoporteurs diphasiques de type coulis de glace constituent indiscutablement une technique prometteuse pour le stockage et transport de froid [1]. Les travaux de recherches se poursuivent actuellement autour des techniques de production et sur la connaissance de leurs propriétés physiques ([2,3]) en vue d'ouvrir cette technologie à un large éventail d'application comme par exemple la climatisation.

Cet article a pour objectif de présenter un nouveau fluide destiné au transport et distribution de froid positif, la température de transition de phase étant de 7°C. Une étude récente [4] montre que l'utilisation d'un tel fluide permet d'envisager des réductions de consommations de près 20% par rapport à un système utilisant de l'eau glacée. Les travaux sur le coefficient d'échange par convection et sur la durée de fusion d'une particule sont présentés ici en vue d'avoir un aperçu de ses potentialités.

2. Présentation du matériau

Le matériau à changement de phase est obtenu en mélangeant intimement à 100°C un mélange de paraffine de bas point de fusion (~7°C) et un polymère hydrophobe. Après

l'obtention d'un mélange homogène sous agitation, on procède à un refroidissement progressif au cours duquel il se forme une matrice polymère tridimensionnelle capable d'emprisonner entièrement la paraffine. Pour une concentration en polymère de 25% massique, le matériau élaboré répond aux critères établis dans le cahier des charges : bonne tenue mécanique sous cycles thermiques, pas d'exsudation lors de cycles fusion-cristallisation, bas point de fusion (7°C), une chaleur latente élevée et un faible coût.

Un dispositif expérimental permet d'élaborer des particules calibrées de 3 et 4 mm respectivement. Ces particules de MCP sont ensuite dispersées dans de l'eau en vue de constituer le fluide frigoporteur diphasique.

3. Evaluation du coefficient d'échange par convection

La connaissance du coefficient d'échange par convection h entre le fluide diphasique et une paroi s'avère une donnée indispensable pour la finalité du produit. Pour accéder à sa valeur, un dispositif simple, présenté sur la Figure 1, est mis en place comprenant une cuve à double enveloppe, un morceau de cuivre de masse M relié à l'aide d'une tige en téflon à un moteur rotatif et deux thermocouples. Dans la cuve est disposé un coulis de particules. Un thermocouple est introduit dans une micro-cavité à l'intérieur du morceau de cuivre. La cuve et le coulis sont initialement thermostatés à une température initiale T_f , puis à un instant de référence $t=0$, on introduit, au sein du coulis, le morceau de cuivre porté au préalable à la température T_i . Le morceau de cuivre est animé d'un mouvement rotatif autour d'un rayon R à la vitesse V que l'on fixe dès le début de l'expérience. On enregistre la température du cuivre au cours de son refroidissement. A partir de la solution analytique de ce problème simple de transfert thermique sans changement de phase, il est possible d'évaluer la valeur expérimentale du coefficient de transfert de convection h au moyen de l'expression :

$$\ln\left(\frac{(T(t) - T_0)}{(T_i - T_0)}\right) = -\frac{h S}{M C_p} t \quad (1)$$

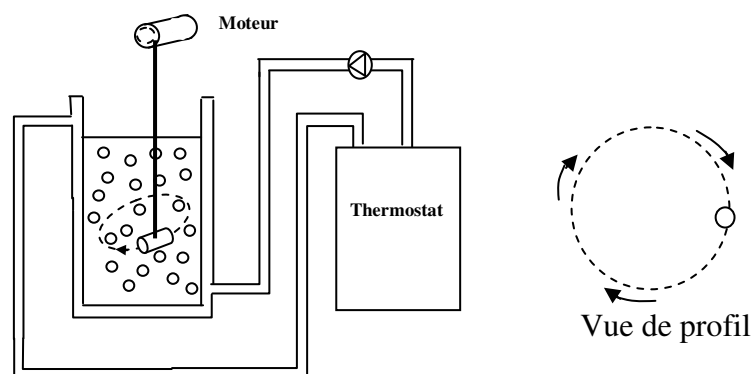


Figure 1: Représentation schématique du dispositif et du mouvement du cylindre de cuivre

Les résultats obtenus pour deux concentrations (15% et 20%) sont présentés sur la figure 2. Ils montrent une augmentation du coefficient de transfert par convection de plus de 20% avec la teneur en particules. Cette augmentation du coefficient d'échange par convection peut être attribuée à une augmentation de la conductivité thermique effective du fluide et par les collisions des particules avec la paroi. Le confinement des particules dans le cas de l'expérience est certes différent de celui rencontré dans les échangeurs; Néanmoins l'expérience permet de mettre en évidence cet effet et un ordre de grandeur du coefficient de

transfert par convection. Il rejoint des résultats déjà été observés sur d'autres coulis s'écoulant dans un échangeur [5,6]. Par rapport à une installation utilisant un fluide monophasique, cette augmentation du coefficient de transfert par convection h permet d'envisager de réduire notablement la taille des conduites de l'installation.

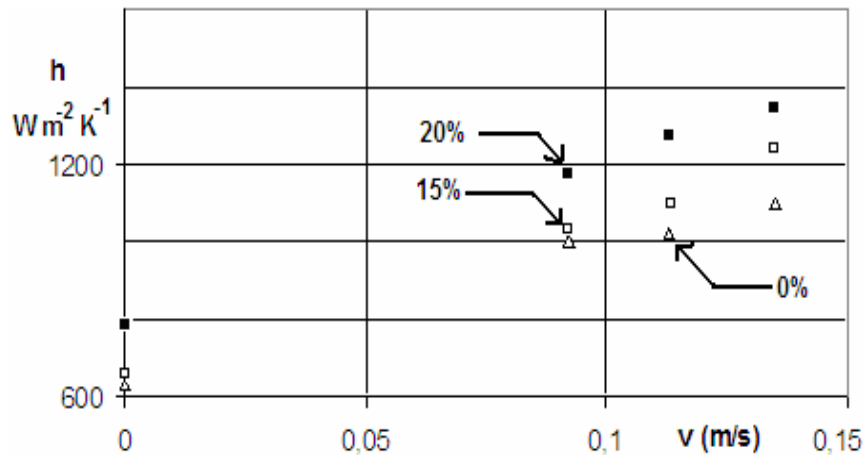


Figure 2 : Coefficient d'échange par convection h en fonction de la vitesse du morceau de cuivre pour l'eau contenant 0%, 15% et 20 % en particules..

4. Durée de fusion d'une particule à changement de phase

Le dispositif expérimental de la figure 3 est développé pour étudier la durée de fusion d'une particule sphérique dans une cuve agitée. Il comprend une cuve à double enveloppe, un agitateur magnétique, deux thermocouples et une sonde spectrométrique visible. Dans ce dispositif est placée une bille placée dans 120 ml d'eau. Un thermocouple est positionné au centre de la bille (à 5% près) et autre disposé à 1cm de la bille. La cuve est initialement thermostatée à une température initiale T_i , puis à un instant de référence $t=0$, on injecte dans la double-enveloppe un fluide à la température T_f . La stabilisation de la température dans la double-enveloppe est inférieure à 5s. La sonde spectrométrique émet une lumière incidente d'intensité I_0 connue concentrée dans un faisceau de taille légèrement inférieure au diamètre de la bille. La lumière traverse alors la particule et l'appareil mesure l'intensité de la lumière I transmise. L'absorbance A à la longueur d'onde étudiée se calcule à partir de :

$$A = \log_{10}\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2)$$

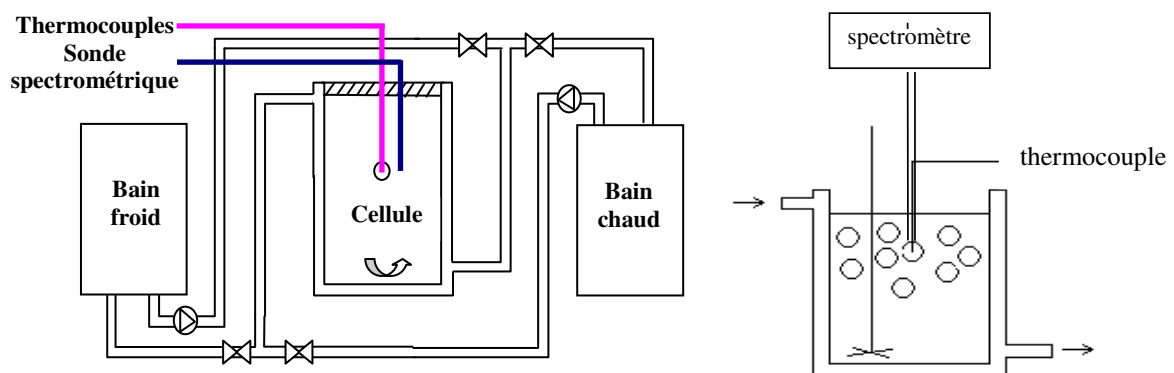


Figure 3 : Dispositif expérimental pour l'étude de cycles thermiques sous agitation
a) vue d'ensemble b) détail de la cellule

Un exemple d'enregistrement de la température pour le cas du réchauffement d'une particule de diamètre 4mm est présenté figure 4. La courbe de température de la bille fait apparaître un écart ΔT avec la courbe de température de la phase aqueuse à partir de 200s jusqu'à environ 400s.

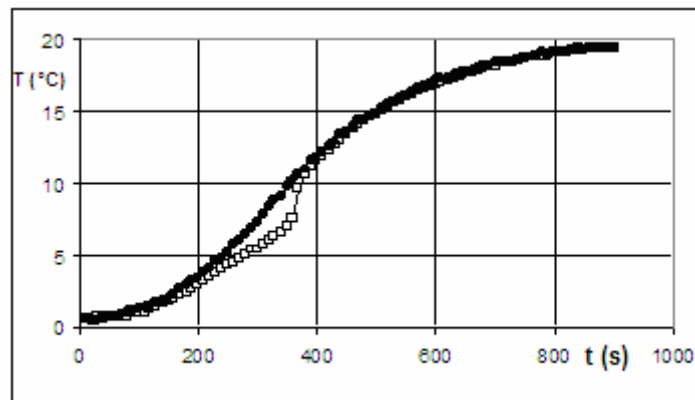


Figure 4 : Température au centre de la bille et dans l'eau en fonction du temps

Si on trace sur un même graphique l'écart de température ΔT entre la température de l'eau et celle de la bille et la quantité $(1 - A_N)$ avec A_N l'absorbance normalisée (ici pour 700nm) définie par $A_N = \frac{A - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}$, on observe sur figure 5, que le maximum de ces deux grandeurs est atteint au même instant. La mesure spectroscopique permet donc d'obtenir de manière non invasive une information sur la fin du processus de fusion.

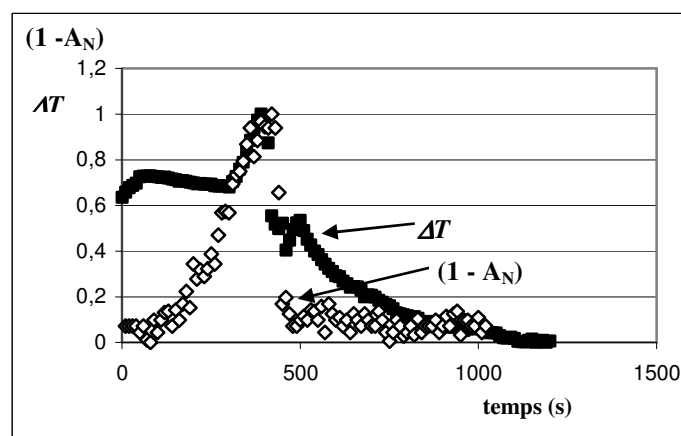


Figure 5 : Ecart de température ΔT et $(1 - A_N)$ en fonction du temps.

La durée du processus de fusion τ , dont le début est pris à l'instant où la particule est soumise à l'échelon de température, est présentée sur la figure 6 en fonction de l'écart de température $\Delta\theta$ correspondant à l'écart entre la température de consigne du bain T_f et la température théorique T_m de changement de phase de la paraffine (soit 7°C). La durée τ , est d'autant plus faible que, d'une part l'écart $\Delta\theta$ est important et d'autre part, que la particule est de petite taille. Ces résultats constituent des données importantes dans le cadre d'une optimisation du processus de fusion.

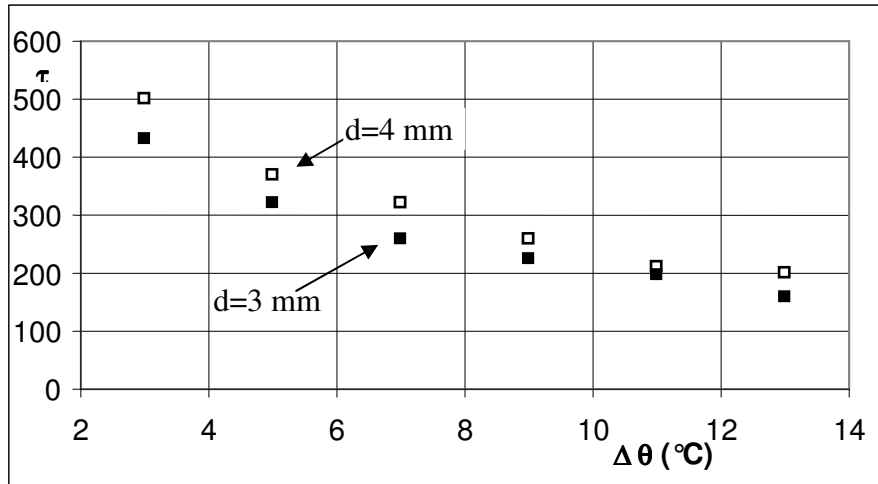


Figure 6 : Durée de phase de fusion τ en fonction de $\Delta\theta$ pour 2 tailles de particules

A partir de ces données, un modèle phénoménologique sur le réchauffement d'une particule soumis à une phase de fusion est proposé, considérant les deux étapes suivantes : i) l'échange de chaleur sensible pendant l'augmentation de température de T_i à T_m , couplé à ii) l'échange de chaleur latente lors de la fusion de la particule. On invite le lecteur à consulter la référence [7] pour plus de détails. Pour ces deux formes d'échanges, il est possible d'associer les temps caractéristiques suivants :

$$\tau_s = \beta \frac{d^2}{\alpha} \quad \text{et} \quad \tau_{La} = \kappa \frac{d}{\left(\frac{h}{\rho L}\right)} \frac{1}{\Delta\theta} \quad (3)$$

Le temps caractéristique de diffusion τ_s est formé par analyse dimensionnelle à partir de la diffusivité thermique et de la taille caractéristique de la particule. Pour la partie correspondant au changement de phase, la dynamique des transferts de chaleur est caractérisée par l'intermédiaire d'un coefficient de transfert h entre le liquide et la particule. Bien que la fusion soit étalée, on considère un écart de température moyen $\Delta\theta$ pour établir le temps caractéristique τ_{La} issu d'un bilan thermique. L'expression du temps caractéristique global τ peut s'écrire finalement sous une forme générale du type :

$$\tau = \tau_{La} + \tau_s \quad (4)$$

Une confrontation des résultats du modèle avec les données expérimentales est présentée sur la figure 8 en prenant $\kappa = 1,6$ et $\beta = 1$ et en posant : $z = 1/\Delta\theta$. On peut observer une assez bonne concordance entre l'expérience et la théorie, ce qui permet de valider l'approche proposée. Une étude similaire se poursuit actuellement dans le cadre d'une phase de solidification. Le même protocole sera ensuite envisagé pour une population de particules.

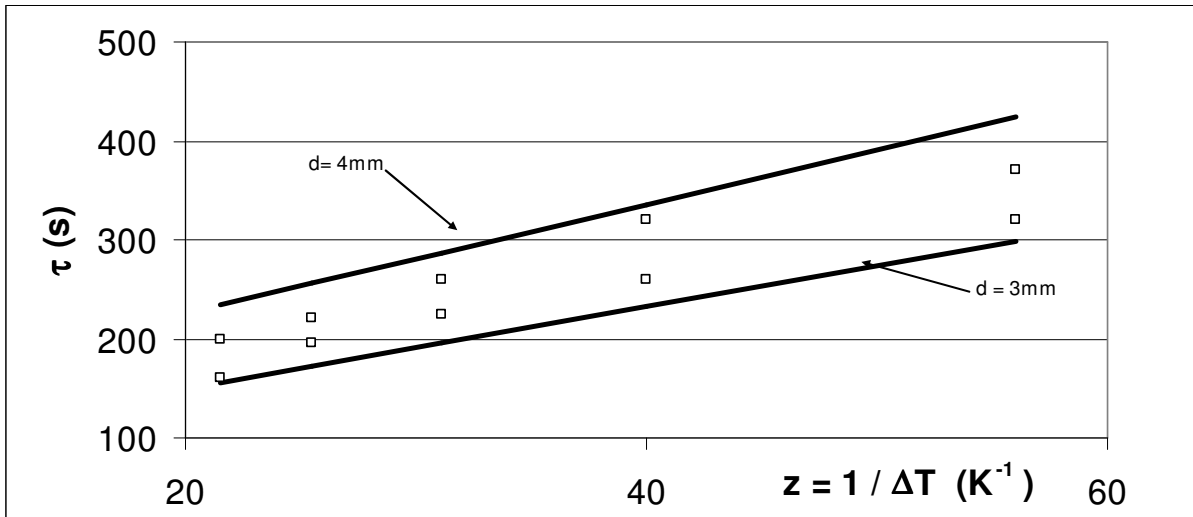


Figure 8 : Durée de phase de fusion τ en fonction de $z = 1/\Delta\theta$ pour deux tailles de particules

5. Conclusion

Les investigations entreprises sur le nouveau fluide frigoporteur diphasique ont permis de mettre en évidence une augmentation du coefficient de transfert de convection avec la concentration en particules. Cette étude devra être complétée par une étude rhéologique en vue d'évaluer la concentration optimale de particules du coulis permettant d'obtenir un compromis réaliste entre perte de charges et coefficient de transfert. L'étude de la fusion d'une particule de MCP a montré que la méthode spectrométrique s'avère suffisamment précise pour détecter la fin de la fusion d'une particule. L'approche phénoménologique proposée constitue un outil utile dans le cadre d'une optimisation du processus de fusion. Ce travail est une première étape dans le vaste cadre de l'étude de la fusion d'un coulis sous écoulement.

Références

- [1] H. Inaba, New challenge in advanced thermal energy transportation using functionally thermal fluids, *Int. J. Therm. Sci.*, 39 (2000), 991 - 1003
- [2] J. Guilpart, E. Stamatiou, L. Fournaison, The control of ice systems: an overview, *Int. J. Refr.*, 28 (2004) 98 – 107.
- [3] V. Ayel, O. Lottin, H. Peerhossaini, Rheology, flow behaviour and heat transfer of ice slurries : a review of the state of art, *Int. J. Refr.*, 26 (2003) 95-107
- [4] P. Haberschill, A. Lallemand, Etude comparative de l'intérêt de l'emploi des fluides frigoporteurs monophasiques et diphasiques pour la climatisation, Cofret'04, (2004) Nancy.
- [5] D. W. Lee, E. S. Yoon, M. C. Joo, A. Sharma, Heat transfer characteristics of the ice slurry at melting process in a tube flow, *Int. J. of Refrigeration*, 29 (2006), 451- 455.
- [6] G. Torres-de María, J. Abril, A. Casp, Surface heat transfer coefficients for refrigeration and freezing of foods immersed in an ice slurry, *International Journal of Refrigeration*, 28 7 (2005), 1040-1047
- [7] L. Royon, G. Guiffant, Heat transfer properties and phenomenological description for latent heat storage on stabilized slurry of paraffin, *Int. Comm. Heat & Mass Transfer*, en revision, déc. 2007.

Remerciement

Les auteurs remercient le CNRS pour son aide financière dans le cadre du programme de recherche intégré 9.1 Distoclim (Energie).